

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS NATURAIS E CERÂMICAS NO FENÔMENO
DE *STICK-SLIP* EM MATERIAIS DE FRICÇÃO AUTOMOTIVOS

por

Matheus de Oliveira Ramos

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Outubro de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Ramos, Matheus

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS NATURAIS E CERÂMICAS
NO FENÔMENO DE STICK-SLIP EM MATERIAIS DE FRICÇÃO
AUTOMOTIVOS / Matheus Ramos. -- 2022.

24 f.

Orientador: Liu Yesukai de Barros.

Coorientador: Gustavo da Silva Gehlen.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Tribologia. 2. Stick-Slip. 3. Material de
Fricção. 4. Fibra Natural. 5. Fibra Cerâmica. I.
Yesukai de Barros, Liu, orient. II. da Silva Gehlen,
Gustavo, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS NATURAIS E CERÂMICAS NO FÊNOMENO
DE *STICK-SLIP* EM MATERIAIS DE FRICÇÃO AUTOMOTIVOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Liu Yesukai de Barros

Coorientador: Engenheiro Gustavo da Silva Gehlen

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Liu Yesukai de Barros

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda minha família, em especial a minha mãe, Eliane, que apesar da distância sempre me deram apoio, confiança e carinho durante todo o período da graduação e do TCC.

Agradeço a minha namorada, Laura, por todo suporte e carinho na etapa final da minha graduação.

Agradeço ao Laboratório de Tribologia (Latrib), especialmente ao meu orientador Prof. Dr. Liu Y. de Barros e o coorientador Eng. Gustavo da S. Gehlen, por toda ajuda, assessoria e apoio nos ensaios, processamento e discussão dos dados.

Agradeço também a Píer Partners, pela oportunidade e experiência adquirida na minha trajetória profissional e apoio durante a execução do TCC.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2022

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS NATURAIS E CERÂMICAS
NO FENÔMENO DE *STICK-SLIP* EM MATERIAIS DE FRICÇÃO
AUTOMOTIVOS**

Ramos, Matheus de Oliveira
matheusoliveirar@hotmail.com

Resumo. *Os sistemas de freios são um dos principais componentes em um veículo, e sua qualidade na operação é imprescindível. Dentre esses sistemas, dependendo do material de fricção utilizado, podem surgir ruídos de baixa frequência devido às vibrações causadas em frenagens de baixa velocidade ou na iminência de partida do veículo. Estas vibrações estão associadas ao fenômeno do stick-slip, processo de agarramento e deslizamento que acontece entre a pastilha de freio e o disco. Frente às tendências de materiais de fricção ecológicos, este trabalho teve como objetivo estudar a aplicação de fibra natural, analisando o fenômeno de stick-slip. Para isso, foi comparada a ocorrência do stick-slip em uma pastilha de freio na qual utilizou fibra de Grewia Optiva em sua formulação, com uma pastilha com fibra cerâmica, material largamente utilizado como pastilha de freio. Também foi ensaiado uma formulação comercial para comparação. No trabalho, foram mensurados parâmetros relacionados ao stick-slip, com base em ensaios tribológicos. Com os parâmetros mensurados, observou-se que a pastilha comercial não apresentou stick-slip. Também se concluiu que a pastilha com fibra natural obteve coeficientes de atritos semelhantes à pastilha com fibra cerâmica, mas com menor presença de stick-slip, apresentando-se como um potencial uso como material de fricção.*

Palavras-chave: *stick-slip, fibra natural, fibra cerâmica, Grewia Optiva, atrito*

Study of the influence of natural and ceramic fibers on the stick-slip phenomenon in automotive friction materials

Abstract. *Brake systems are one of the main mechanisms in a vehicle, and their quality in operation is essential. Among these systems, depending on the friction material used, low-frequency noises may arise due to vibrations caused by low-speed braking or when the vehicle is imminent to the movement. These vibrations are associated with the stick-slip phenomenon, a process of gripping and sliding that takes place between the brake pad and the disc. Faced with the trends of eco-friendly brake friction materials, this work aimed to study the application of natural fiber, analyzing the stick-slip phenomenon. For this, it was compared the occurrence of stick-slip in a brake pad in which Grewia Optiva fiber was used in its formulation, with a ceramic fiber pad, a material widely used as a brake pad. A commercial formulation was also tested for comparison. During the work, parameters related to the stick-slip were measured, based on tribological tests. According to measured parameters, it was observed that the commercial brake pad did not present a stick-slip. It was also concluded that the brake pad with natural fiber obtained friction coefficients similar to the brake pad with ceramic fiber, but with less presence of stick-slip, presenting itself as a potential ingredient for friction materials.*

Keywords: *stick-slip, natural fiber, ceramic fiber, Grewia Optiva, friction*

NOMENCLATURA

Símbolos

F	Força Tangencial	[N]
F_s	Força de atrito estático	[N]
F_k	Força de atrito dinâmico	[N]
F_N	Força Normal	[N]
T	Torque	[N.m]
R_e	Raio Efetivo	[m]
t	Tempo	[s]

Símbolos gregos

μ	Coefficiente de Atrito
-------	------------------------

Abreviaturas e acrônimos

GO	Grewia Optiva
NAT	Formulação de fibra natural
CER	Formulação de fibra cerâmica
COM	Formulação comercial
NAO	<i>Non -asbestos organic</i>
SP	Slip power
LATTRIB	Laboratório de Tribologia - UFRGS

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO	2
2.1 Atrito	2
2.2 Materiais de Fricção.....	2
2.3 Fibra Natural	2
2.4 Stick-slip	3
3. METODOLOGIA	6
3.1 Amostras	6
3.2 Equipamentos.....	6
3.3 Procedimento do Ensaio	7
4. RESULTADOS	9
5. CONCLUSÃO	14
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

A qualidade da operação de um sistema de freio em um veículo é de grande importância, uma vez que este componente é o responsável pela desaceleração de forma controlada do veículo. Por consequência, este é um dos principais componentes a serem revisados em manutenções periódicas. Dentre os possíveis problemas em sistemas de freio a disco estão as vibrações e ruídos causados pelo atrito entre o rotor (disco) e a pastilha de freio. Apesar dos ruídos em freios não necessariamente significarem um problema de segurança, estes causam um aumento da poluição sonora no trânsito, além de causar a impressão de problemas de qualidade ou incômodo para o condutor (GHAZALY *et al.*, 2014).

Existem diferentes tipos de ruídos gerados em sistemas de freios, sendo um deles o *creep groan*, o qual é um ruído de baixa frequência sonora. O *creep groan* difere, por exemplo, do *squeal*, no qual é um ruído “gritante” com maior frequência sonora (LIU; PFEIFER, 2000). O *creep groan* pode ocorrer quando o veículo está em pequenas velocidades ou na iminência de movimento, em geral, em situações de parada e partidas como tráfego no trânsito e balizas (NEIS *et al.*, 2016). Este tipo de ruído normalmente é associado ao efeito de *stick-slip*, o qual é um fenômeno de agarramento e deslizamento entre duas superfícies em contato, que no caso são as superfícies do disco e da pastilha de freio. Com a finalidade de amenizar ou eliminar esses fenômenos, fabricantes podem utilizar lubrificantes ou outros tipos de ingredientes na formulação de materiais de fricção (JANG; LEE; FASH, 2001).

De acordo com AHMADIJOKANI *et al.*, 2019, há diferentes materiais utilizados como fibras nas formulações de materiais de fricção. Entre estas, destacam-se as fibras cerâmicas, naturais, carbono, vidro e entre outras. A fibra cerâmica, por exemplo, é largamente utilizada devido a sua alta dureza e estabilidade térmica (SOLOMON; BERHAN, 2007). Cabe salientar também que alguns ingredientes ao serem desgastados formam partículas prejudiciais ao meio ambiente. Como exemplo, segundo YUN; FILIP; LU, 2010, as partículas de desgaste contendo cobre, metal também muito utilizado na formulação de materiais de fricção, são depositadas em rios e lagos através da ação das chuvas. Estas partículas afetam o meio ambiente aquático, causando perturbações no olfato de algumas espécies de peixes, deixando-os mais vulneráveis a predadores. Devido a esse impacto ambiental, legislações estão sendo criadas nos Estados Unidos para impor sua limitação do uso de cobre em material de fricção nos sistemas de freio (LEE; FILIP, 2013).

Nesse sentido, práticas sustentáveis e o apelo atual por governança ambiental, social e corporativa (ESG) são tópicos de relevância por empresas, investidores e pesquisadores (LI *et al.*, 2021). Dessa maneira, materiais alternativos que utilizam fibras naturais em materiais de fricção, os quais reduzem o impacto ambiental proveniente de seu desgaste, são cada vez mais pesquisados, de forma a atender as propriedades e os critérios de qualidade exigidos. Pode-se citar diferentes estudos que demonstram as fibras naturais como potencial uso em materiais de freio: ALI *et al.*, 2022 demonstram que pastilhas com fibra de coco em sua formulação apresentaram boas propriedades físicas e mecânicas quando comparadas com pastilhas de freio padrão. Da mesma forma, SINGH *et al.*, 2019 verificaram que o material de fricção reforçado com fibra de rami apresentou resultados adequados para padrões tribológicos da indústria. BAJPAI; SINGH; MADAAN, 2013, concluíram que fibras naturais, como *Grewia Optiva* (GO), são possíveis candidatos de serem utilizados como reforço em materiais de fricção.

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem por objetivo analisar o efeito de *stick-slip* em formulações de pastilhas de freio com fibras naturais de GO, material promissor como um substituto de fibras tradicionais utilizadas em pastilhas de freio comerciais (BAJPAI; SINGH; MADAAN, 2013). Para isso, uma pastilha de freio que utiliza esta fibra como ingrediente é comparada com uma pastilha com fibra cerâmica e com uma pastilha comercial. Os ensaios de

frenagem foram realizados em um tribômetro do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Atrito

A força de atrito, segundo BHUSHAN, 1996, é a resistência ao movimento quando um sólido tende a deslizar sobre um outro corpo ou superfície paralela à direção do movimento. REYNOLDS, 1883 também analisou a presença do fenômeno de atrito em fluídos. BHUSHAN, 1996, complementa que se há dois corpos juntos e uma força tangencial (F) é aplicada, então o valor dessa força F requerida para iniciar o deslizamento é força de atrito estático (F_s) e após o início do movimento, a força tangencial necessária para manter o deslizamento é chamada de força de atrito dinâmico (F_k).

Há duas leis intrínsecas que regem o fenômeno do atrito conhecidas como leis de Amontons - em referência ao engenheiro que as definiu em 1699. Essa primeira lei diz que o atrito é independente da área aparente de contato entre dois corpos. Já a segunda lei determina que a força F é proporcional a um carregamento normal (F_N) entre os corpos (BHUSHAN, 1996). A importância da segunda lei de Amontons se dá, pois, a partir dessa, pode-se definir um coeficiente de atrito, dado a proporcionalidade entre as forças F e F_N . Esse coeficiente de atrito, por sua vez, varia de acordo com diferentes materiais e condições de operação.

2.2 Materiais de Fricção

As pastilhas de freio são materiais de fricção que, quando pressionados contra o disco são responsáveis por dissipar a energia cinética do veículo em calor, reduzindo assim a sua velocidade (KUMAR; KUMARAN, 2019). Segundo OSTERMEYER, 2003, os materiais de fricção podem ter mais de 20 componentes diferentes em sua composição, sendo que estes são classificados de acordo com sua resistência (estrutural), capacidade de aglutinação de componentes (ligantes), estabilizadores (cargas) e aditivos de atrito.

Segundo RASHID, 2014, materiais de fricção são classificados de diferentes maneiras em distintos estudos. A exemplo, OWEN, 2010 classifica eles em: orgânico, *semi-metálico*, metálico, sintético e cerâmico. Já HILLER, 2007, classifica os materiais de fricção em: *semi-metálico*, *low-steel low-metallic*, *no-steel low-metallic* e *European metallic*. Outra classificação comum é a proposta por BIRCH, 1999 em que se utiliza dois grandes grupos: *non asbestos organic* (NAO) e *semi-metálico*. Nesta classificação de BIRCH, 1999, NAO é composto de fibras naturais ou fibras minerais, enquanto *semi-metálico* apresenta em sua formulação compostos metálicos que pode chegar até 50% de seu peso. Ainda BIRCH, 1999, apresenta que os materiais *semi-metálico* são mais resistentes a elevadas temperaturas e dispõem de uma vida útil maior do que NAO.

2.3 Fibra Natural

As fibras naturais são utilizadas em materiais compostos há mais de três mil anos. Como exemplo, os egípcios utilizavam barro e palha de bambu para construção de casas (TAJ; ALI MUNAWAR; ULLAH KHAN, 2007). Atualmente, as fibras naturais estão ganhando cada vez mais relevância dado o aumento da percepção ambiental, sendo atrativas em função da facilidade de fornecimento, baixo peso e atoxicidade (SINGHA; THAKUR, 2009).

Há diferentes fibras que já foram estudadas pelos seus potenciais usos na engenharia mecânica, civil, aeronáutica e entre outras. Como exemplo, temos a fibra de sisal, que, segundo

ZENG et al., 2010, possui boas propriedades mecânicas e boa durabilidade em testes de fricção. Pode-se citar também as fibras de bambu e a fibra de rami, nas quais KUMAR et al., 2019 e MA et al., 2013, em seus resultados, mostraram que, com a formulação adequada é possível obter materiais de fricção com níveis de qualidade adequados considerando ruídos e durabilidade.

Entre as fibras naturais, se destaca a fibra de *Grewia Optiva* (GO). Essa é uma espécie de árvore de folha seca, com altura de 13 a 15 metros, abundante no território da Índia e do Nepal (RANA; POTLURI; THAKUR, 2021). A fibra de GO já é usada artesanalmente para a fabricação de cordas, tapetes e botinas. A fim de se obter a fibra da planta, faz-se a imersão dos brotos da *Grewia Optiva* em água e, após o gado comer as folhas por um período de um mês, retira-se os brotos para posteriormente macerá-los e assim, obtêm-se a fibra. RANA; POTLURI; THAKUR, 2021 descreveram a composição química da GO por meio de componentes de celulose, hemicelulose, lignina e pectina, comparando-a à composição de outras fibras naturais (Tabela 1). Entretanto, há variações sobre a composição química da fibra GO justamente porque, em geral, a composição química das fibras GO varia de acordo com a sua origem, tipos de processo de maceração e métodos empregados para a extração das fibras.

Tabela 1 – Composição de Fibras Naturais [Adaptado de RANA; POTLURI; THAKUR, 2021 e YUEPING et al., 2010]

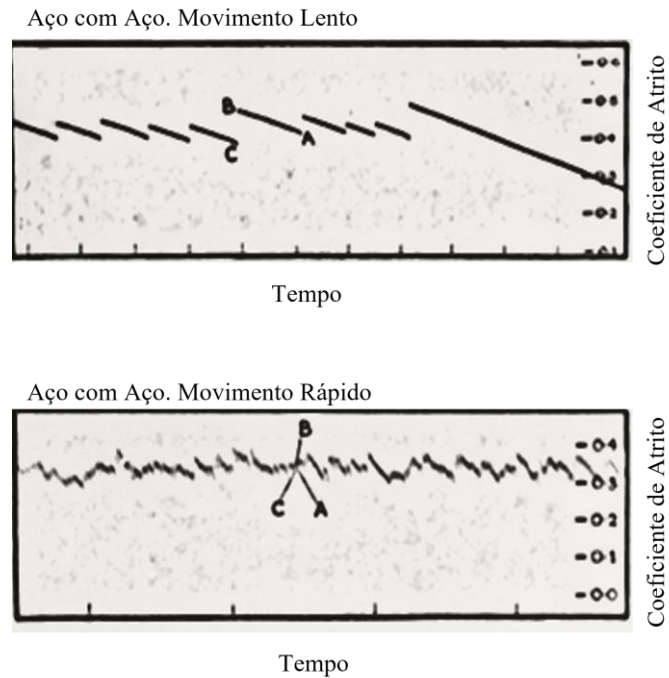
Fibra	Celulose [%]	Hemicelulose [%]	Lignina [%]	Pectina [%]
Grewia Optiva	55,0-65,0	20,0-25,0	3,0-4,0	15,0-25,0
Fibra de Bamboo	73,8	12,5	10,2	0,4
Sisal	67,7	12,0-13,0	0,8	9,9
Rami	68,0-91,0	5,0-16,0	0,6-0,7	1,9

Uma das deficiências da aplicabilidade das fibras naturais é que normalmente essas fibras não são suscetíveis a altas temperaturas, sendo substituídas, em alguns casos, por fibras cerâmicas, que suportam melhor o calor (TAJ; ALI MUNAWAR; ULLAH KHAN, 2007). A estabilidade térmica das fibras naturais depende principalmente da razão relativa de ingredientes primários, ou seja, celulose, hemicelulose e lignina. Ademais, a estabilidade térmica das fibras naturais também é influenciada pelo método de extração, região de coleta, condições climáticas, estações do ano, etc. A celulose se degrada entre 260 e 350°C, enquanto as hemiceluloses são comparativamente menos estáveis, sofrendo degradação com temperaturas na faixa de 200–260°C e, por fim, a lignina se deteriora em uma faixa de 160°C a 400 °C (RANA; POTLURI; THAKUR, 2021).

2.4 *Stick-slip*

O termo *stick-slip* foi apresentado por BOWDEN; LEBEN, 1939, pela Universidade de Cambridge, em um estudo onde estavam sendo replicados terremotos. Ao longo do experimento foram utilizados diversos corpos em contato, como aço com aço, aplicando forças com a intenção de superar o atrito estático. E assim, por fim, medir alguns parâmetros como deslocamento no sistema e o atrito entre os corpos. Um de seus resultados foram observados na Figura 1, onde demonstra o coeficiente de atrito em função do tempo em diferentes movimentos.

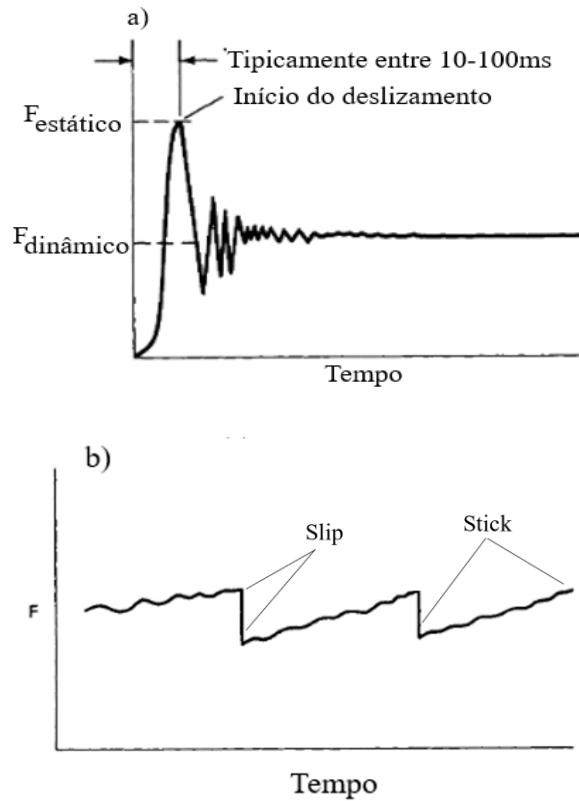
Figura 1 – Experimento de *stick-slip* [Adaptado de BOWDEN; LEBEN, 1939]



Uma das observações no resultado de BOWDEN; LEBEN, 1939, foi a variação do coeficiente do atrito ao longo do tempo. Este parâmetro flutuou abruptamente durante o experimento, onde conforme a Figura 1, AB correspondeu a etapa de agarramento entre as superfícies (*stick*) e de BC o deslizamento (*slip*). Com a presença das duas etapas, BOWDEN; LEBEN, 1939 definiu o fenômeno de *stick-slip*.

Mais recentemente, BHUSHAN, 1996, definiu que, para um corpo deslizando sobre outro, com uma força de tração constante, é esperado uma velocidade praticamente constante, mas que em certas ocasiões esta velocidade e a força de atrito poder ter variações significativas. Temos que para a força de atrito não constante ocorre oscilações, que chamamos de *stick-slip*. O efeito do *stick-slip* ocorre em duas fases. Na primeira fase ocorre o agarramento (*stick-phase*), onde a força de atrito cresce até um determinado valor (Figura 2-a), resultando na segunda fase, onde inicia-se o deslizamento (*slip-phase*). Normalmente, essas duas fases são vistas por um padrão de dente de serra, quando se observa a curva da força de atrito em função tempo, conforme a Figura 2-b abaixo.

Figura 2 – Oscilação da Força de Atrito [Adaptado de BHUSHAN, 1996]



Ao analisar o *stick-slip*, sob o ponto de vista dos coeficientes de atrito, observa-se que uma força de atrito cresce até que esta supere a resistência do coeficiente de atrito estático apresentada nos corpos. Após a força ultrapassar essa resistência, o movimento relativo entre dois corpos começa a acontecer, resultando a fase de deslizamento (*slip*). Assim, o fenômeno de *stick-slip* causa oscilações nos descolamentos entre superfícies em contato, como por exemplo, entre a pastilha e o disco de freio de um veículo. Essas oscilações, por sua vez, geram vibrações e ruídos como o *creep groan*. GAO; KUHLMANN-WILSDORF; MAKEI, 1993, complementaram em estudos que o atrito dinâmico menor do que estático é uma condição necessária para o *stick-slip*, sendo que quanto maior essa diferença entre atritos, maior a magnitude de *stick-slip*.

O *creep groan*, segundo NEIS et al., 2016, é uma vibração acompanhada de um ruído de baixa frequência sonora (menores que 300 Hertz) que ocorre em situações em que o sistema de freio está agindo com o veículo na iminência de movimento ou em baixas velocidades. Segundo FUADI et al., 2009 o *creep groan* se associa principalmente a diferença entre os coeficientes de atrito estático e dinâmico e a rigidez do sistema de freio. DESPLANQUES et al., 2007, complementam também que para uma maior de pressão de contato aplicada em uma mesma velocidade, menor o coeficiente de atrito.

NEIS et al., 2016, em seus estudos também definiram um parâmetro para quantificar a magnitude do *stick-slip* chamado de *slip-power*. Esse parâmetro mede a variação do torque ao longo do tempo de deslizamento, demonstrando a quantidade de energia dissipada no tempo. Nos resultados de NEIS et al., 2016, foi demonstrado que conforme o aumento do *slip-power* maior a propensão do material para *creep groan*.

3. METODOLOGIA

3.1 Amostras

Com a finalidade de avaliar o desempenho da fibra natural e cerâmica na pastilha de freio em relação ao *stick-slip*, foram desenvolvidas duas formulações: uma formulação contendo fibra natural (NAT) e outra contendo fibra cerâmica (CER). Os detalhes das formulações são apresentados na Tabela 2. As formulações CER e NAT são similares em 90% de seu peso, sendo constituído por ingredientes tradicionais de pastilhas de freio. Os 10% restantes se referem ao tipo de fibra utilizada, GO para o caso da formulação NAT e cerâmica para a formulação CER. Tanto a formulação CER e NAT podem ser classificadas como materiais de fricção do tipo *low metallic* pela presença de lã de aço em seus ingredientes. Para fins comparativos, também foi ensaiada uma amostra comercial (COM). Ao longo do procedimento experimental foram utilizadas nove amostras, sendo três para cada formulação.

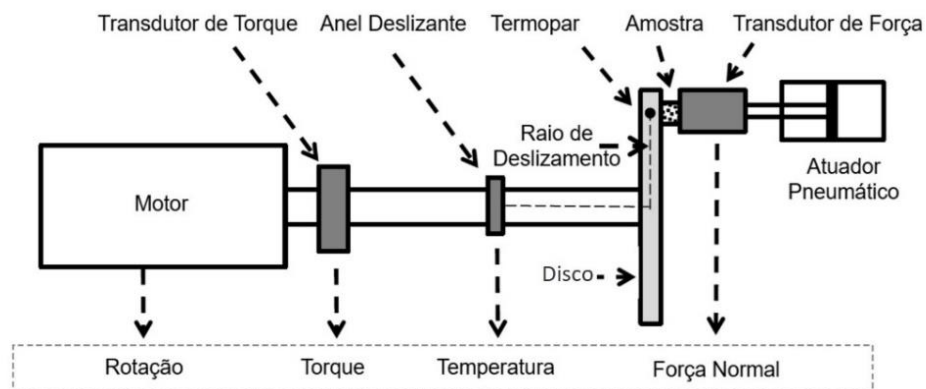
Tabela 2 – Formulações das Amostras, em percentual do peso

Amostra	Ingredientes em % do peso total								
	Resina Fenólica	Barita	Grafite	Vermiculita	Óxido de Alumínio	Lã de Aço	Fibra Alpinos	Fibra Cerâmica	Grewia Optiva
NAT	10	50	6	5	3	6	10	0	10
CER								10	0

3.2 Equipamentos

Para a execução dos experimentos, foi utilizado o tribômetro do Laboratório de Tribologia da UFRGS – LATRIB, conforme esquematizado na Figura 2. O equipamento permite que sejam reproduzidas condições reais de um sistema de freio automotivo, variando velocidade, pressão de contato e temperatura (NEIS, 2012).

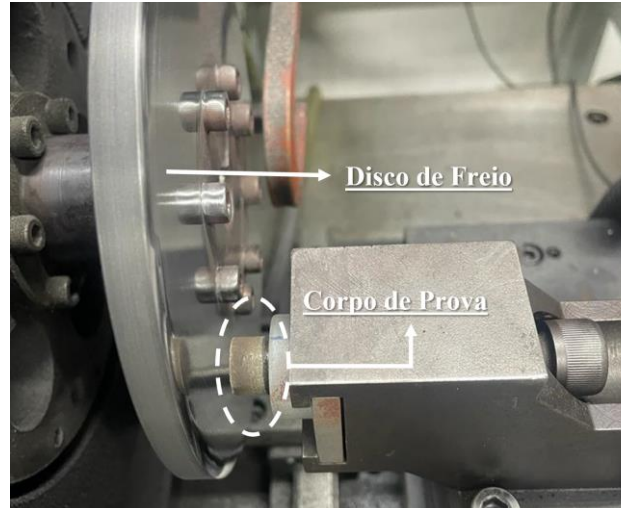
Figura 2 – Diagrama esquemático do tribômetro (Adaptado: GEHLEN, 2020)



A superfície do corpo de prova foi posicionada de forma paralela ao disco de freio, como é mostrado na Figura 3. O disco de freio utilizado nos ensaios é feito de ferro fundido, com

diâmetro de 159 mm e espessura de 12 mm. O material e suas dimensões tentam replicar um disco de freio comercial (NEIS, 2012).

Figura 3 – Tribômetro utilizado para o procedimento experimental



Neste tribômetro, as medições dos dados foram realizadas por meio de diversos sensores, onde destaca-se o *encoder*, com resolução de 5.000 pulsos/revolução (NEIS, 2012), responsável pela medição da posição angular do disco ao longo dos experimentos. Assim, ao longo do procedimento experimental, o *encoder* permite o monitoramento do efeito *stick-slip* durante os testes realizados no tribômetro.

3.3 Procedimento do Ensaio

Previamente ao ensaio de avaliação do *stick-slip* foi efetuado o procedimento do AK Master (SAE J2522), o qual é um teste de performance típico para avaliação do material de fricção, onde este é submetido a diferentes pressões, temperaturas e velocidades de deslizamento. Este procedimento foi efetuado para assentamento dos materiais, permitindo evitar as flutuações de atrito nessas amostras de material “virgem”, que ainda não foram ensaiadas. Devido ao escopo do trabalho estar voltado para o teste do *stick-slip*, não será analisado os resultados do AK Master.

A Tabela 3 apresenta as condições do procedimento experimental do *stick-slip*. Um ciclo de ensaio consiste em uma força normal iniciando em 1.000 N, a qual é reduzida linearmente até zero em 100 segundos, com a rotação do disco em 0,5 rpm e executados 30 ciclos para cada amostra. Além disso, foi considerado um tempo de 40 segundos de estabilização com aplicação de 1.000 N de força normal e rotação de 0,5 rpm antes de cada experimento, de forma que a análise foi realizada após este intervalo.

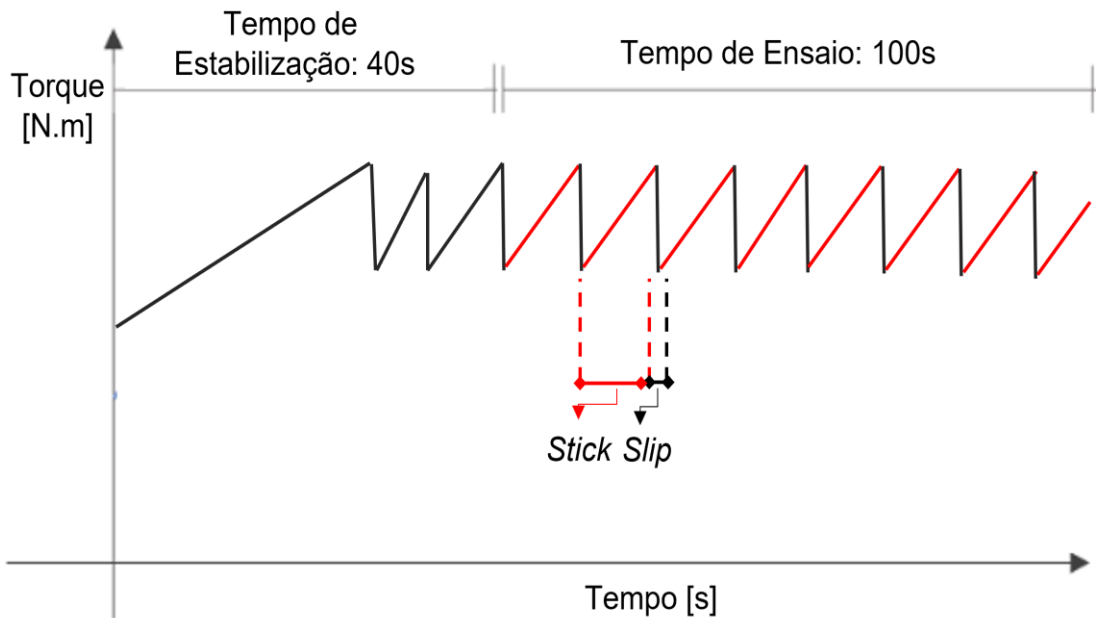
Tabela 3 – Parâmetros do procedimento experimental para avaliação do *stick-slip*.

# de Ciclos	Força Normal Inicial Aplicada no Disco [N]	Taxa de Redução de Força [N/s]	Rotação do Disco [rpm]	Tempo de Ensaio [s]
30	1.000	10	0,5	100

Estas condições de ensaio foram aplicadas nas três formulações, com três repetições para cada, em condições de temperatura ambiente. Após os ensaios, com os dados adquiridos no *encoder*, foi utilizado um Software registrado como "LATRIB Pro-AE", para um processamento prévio dos dados obtidos. Assim, foram analisadas as seguintes variáveis:

- **Número de eventos de *stick-slip* por repetição:** é o parâmetro que demonstra a quantidade de *stick-slip*, ou seja, de eventos onde acontece um agarramento e deslizamento até o próximo evento. Portanto, quanto menor o número de eventos de *stick-slip*, menor a tendência de ruído produzido pelo material de fricção. Na Figura 4, é apresentada a esquematização do evento de *stick-slip*, em que nas etapas de *stick*, o torque aumenta dado o agarramento, e não há velocidade relativa entre o disco e amostra para esse torque inicial (Destacado em vermelho na Figura 4).

Figura 4 – Evento de *stick-slip*.



- **Coefficiente de Atrito:** Também é avaliado o coeficiente de atrito estático e dinâmico. Nesse parâmetro, quanto maior for a variação dele ao longo do tempo, maior é a presença do efeito de *stick-slip*. O coeficiente de atrito (μ) neste tribômetro é calculado, conforme na Equação 1 abaixo, a partir da relação do torque (T [Nm]), força normal (F_N [N]) e o raio efetivo do disco (R_e [m]), os quais os três são variáveis de entrada no sistema, conforme NEIS, 2008.

$$\mu = \frac{T}{R_e F_N} \quad (1)$$

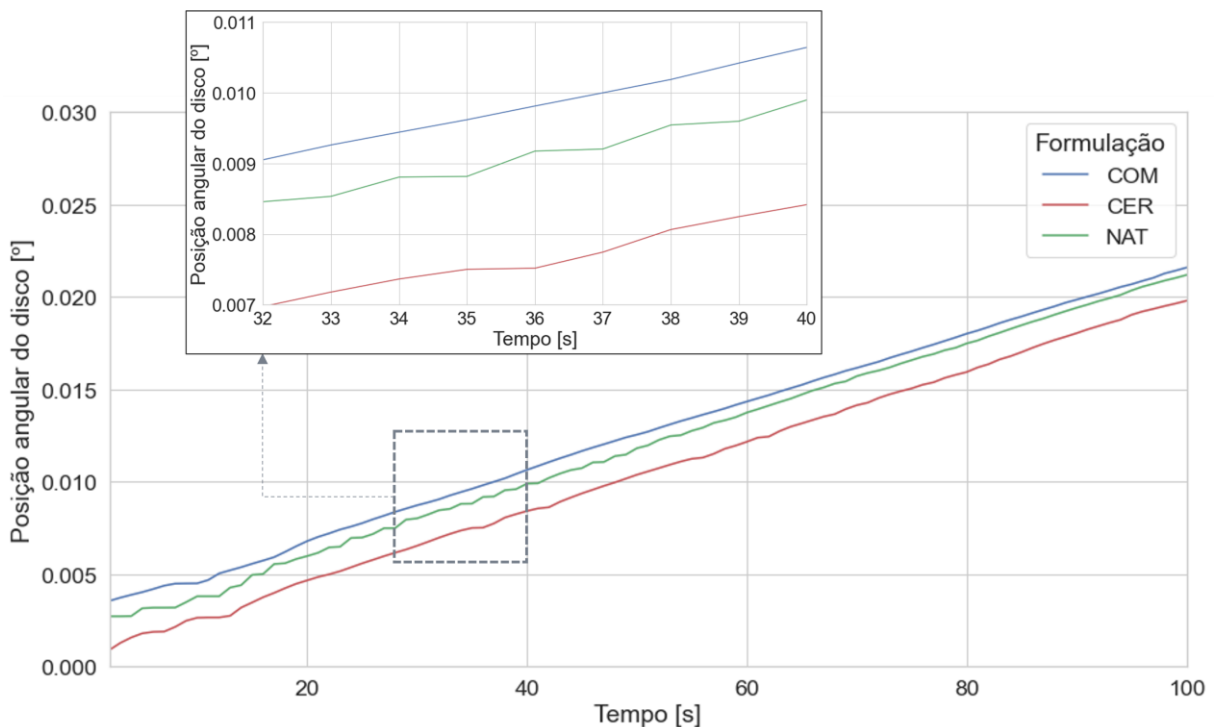
- **Slip Power:** Conforme apresentado na seção 2.4, é o parâmetro que quantifica a magnitude do movimento do *stick-slip* de acordo com a variação do torque por intervalos tempo, durante a fase de deslizamento. É calculado conforme a Equação 2 abaixo, onde T corresponde ao Torque [Nm], t é o tempo [s] e os subíndices k e s, representam, respectivamente, dinâmico ou estático (NEIS *et al.*, 2015). Quanto maior este valor, maior a ocorrência do *stick-slip*. Desta forma, experimentos com alto valor de *slip power* resultam em materiais de fricção mais propensos a ruído.

$$SP = \frac{\Delta T}{\Delta t_{slip}} = \frac{T_s - T_k}{t_k - t_s} \left[\frac{Nm}{s} \right] \quad (2)$$

4. RESULTADOS

Na Figura 5 são apresentados os valores da curva de posição angular (via *encoder*) de um teste para uma amostra de cada formulação. Como as outras repetições em cada amostra apresentaram resultados similares, optou-se por mostrar apenas uma curva para cada material. Foi destacado na figura também a secção de tempo entre 30 e 42 segundos, onde fica perceptível os diferentes comportamentos das três formulações.

Figura 5 – Posição angular do disco no tempo para as diferentes formulações.

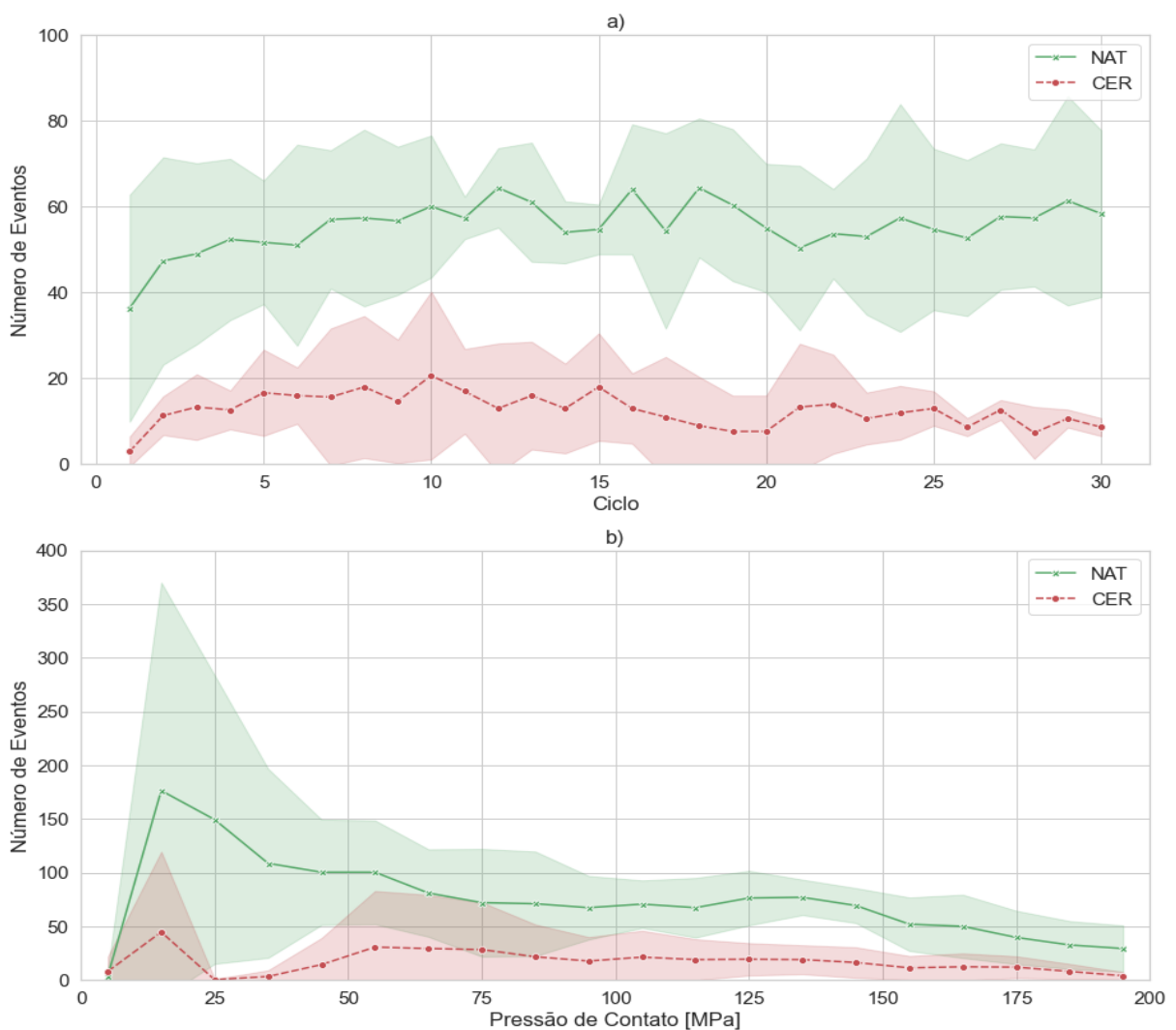


A partir da Figura 5, pode-se visualizar que na fase de “*stick*”, o valor do deslocamento angular se estabiliza, indicando momentos em que o disco está parado. Por outro lado, nos momentos de “*slip*”, o disco está deslizando e o valor da posição angular aumenta. Este efeito de *stick-slip* fica mais claro ao observar o período destacado entre 32 a 40 segundos. De forma visual, pode ser confirmado o *stick-slip* pelo padrão dente de serra que a curva do CER e NAT tiveram. Da mesma maneira ainda é perceptível pelas etapas de deslizamento e agarramento ao

longo do tempo que a formulação com fibra CER apresentou *stick-slip*, mas em menor número de ocorrências do que a NAT. Já a formulação comercial (COM) teve somente deslizamento, observado pelo contínuo deslocamento angular medido pelo *encoder* no tempo, logo, não apresentando *stick-slip* no ensaio tribológico.

A Figura 6 mostra o número médio de eventos de *stick-slip* para cada tipo de formulação em função do ciclo do ensaio (Fig.6-a) e de acordo com a pressão de contato (Fig.6-b). A área demarcada envolta da curva representa os limites superiores e inferiores para um desvio padrão. A formulação comercial não esteve presente nos resultados a seguir pois todas as amostras não apresentaram a fase de *stick*, somente a fase de deslizamento, não ocorrendo *stick-slip*.

Figura 6 – Número de Eventos Médio de *stick-slip* para NAT e CER: a) Evento médio por ciclo para NAT e CER e b) Evento médio por pressão de contato para NAT e CER

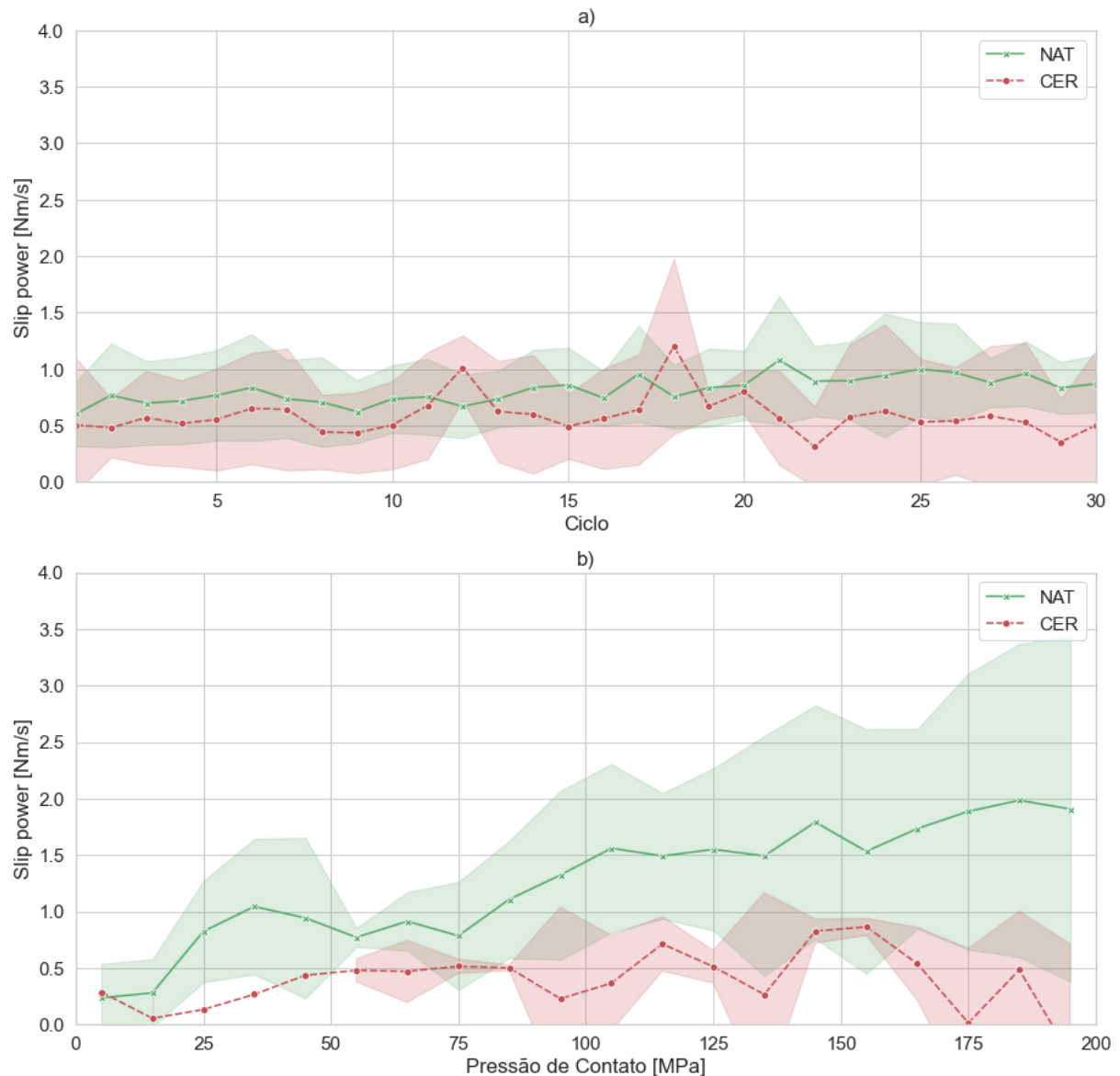


A partir da Figura 6-a, com base no número médio de eventos de *stick-slip* por ciclo, percebe-se que a formulação NAT teve um maior número de *stick-slip* em todos os ciclos quando comparado com a formulação CER. Já na Figura 6-b, observa-se novamente que NAT apresentou maior quantidade de eventos de *stick-slip* em função da pressão. Também é possível inferir que ambas as formulações possuíram mais eventos em menores pressões de contato. CHEN et al., 2021 também citam em seu estudo com formulações de fibra de algodão resultados

similares, que conforme o aumento da pressão de contato aplicada, os eventos de *stick-slip* se tornavam menores, mas a sua magnitude era maior.

Na Figura 7 é apresentado o valor médio de *slip power* em função dos ciclos do ensaio e da pressão de contato, calculado como uma média aritmética entre as três repetições de cada formulação.

Figura 7 – Slip power médio para NAT e CER: a) Slip power médio por ciclo para NAT e CER e b) Slip power médio por pressão de contato para NAT e CER

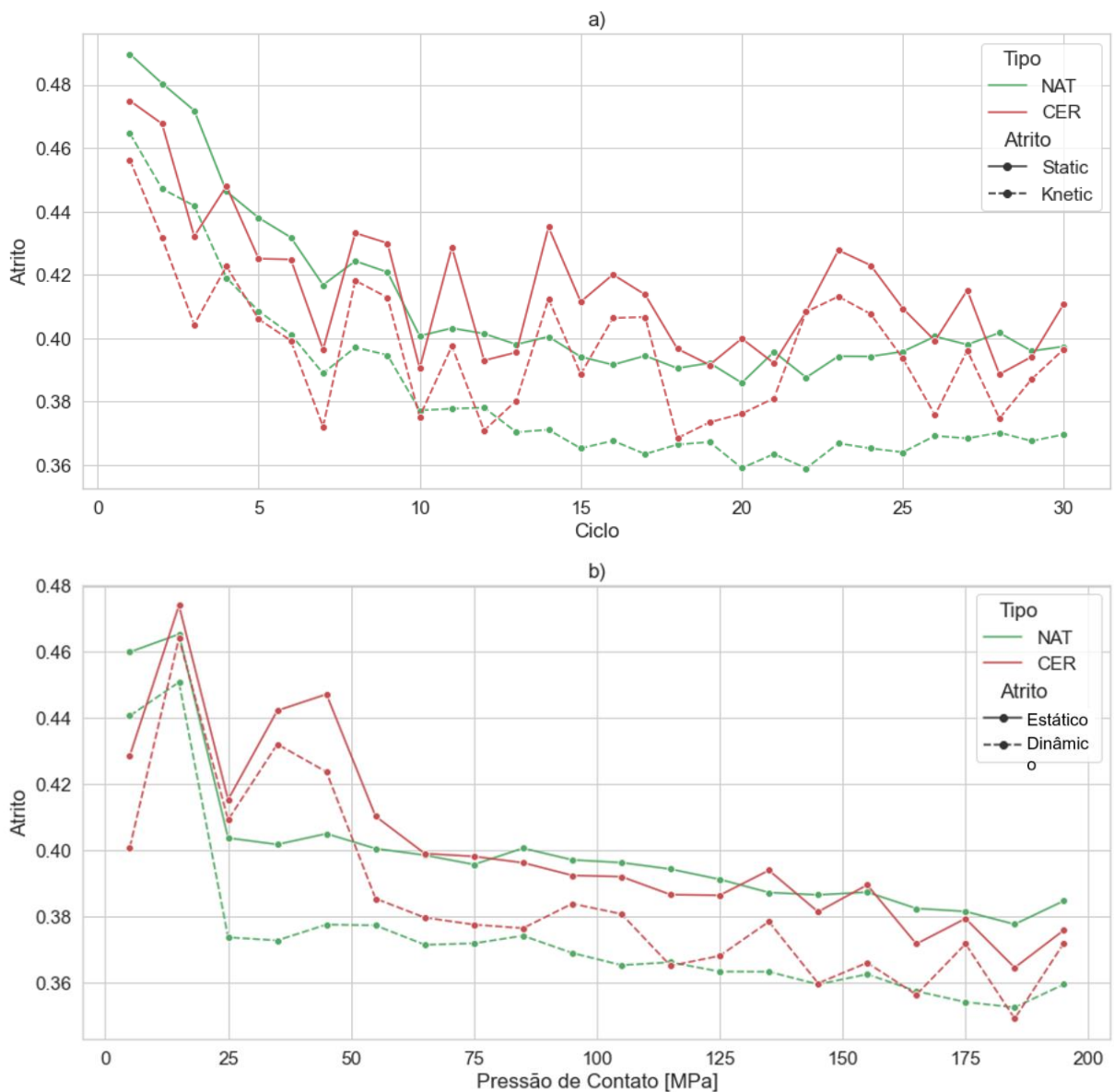


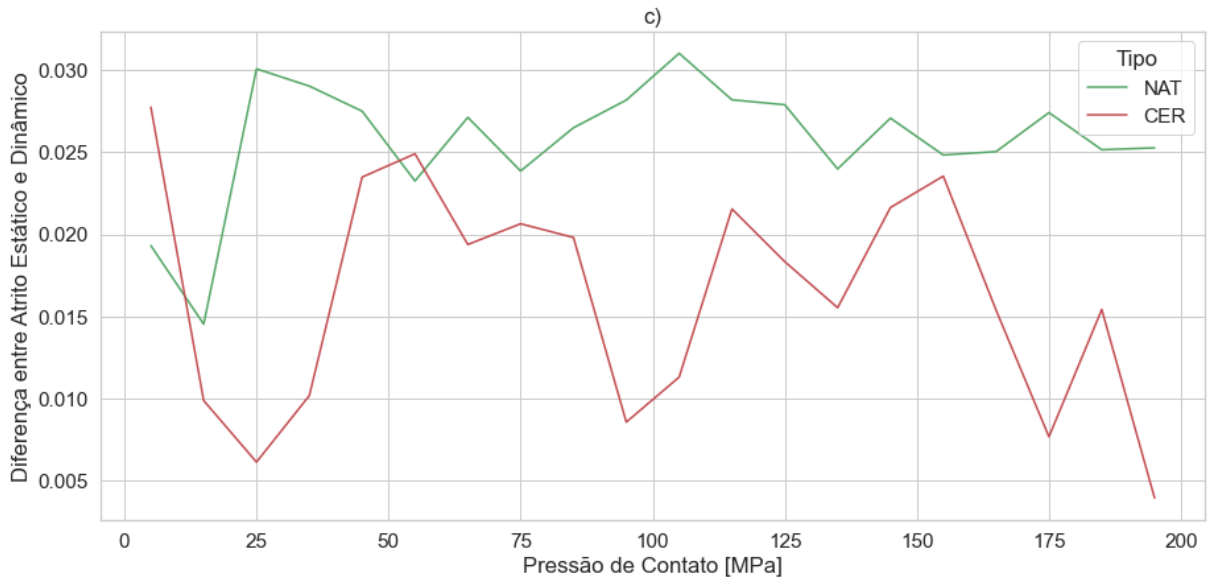
O *slip power*, conforme apresentado na seção 2.4, é um parâmetro que mede a magnitude do *stick-slip*, ou seja, quanto maior o valor do *slip power*, maior é a propensão ao fenômeno do *creep groan*. Quando comparado o *slip power* médio em cada ciclo para as duas formulações, na Figura 7-a, as curvas são muito similares tanto em tendência como em valores. Por outro lado, nota-se com mais clareza a diferença entre as duas formulações quando observadas as curvas da Figura 7-b que são em função da pressão de contato. Nestas curvas é possível visualizar que, quanto maior a pressão de contato, maior o *slip power* que a formulação NAT

obteve. Para todos os valores de pressão, a formulação NAT apresentou valores superiores de *slip power* do que a CER. Nesse sentido, a NAT obteve resultados piores que a CER, dado que, quanto maior o *slip power*, maior é a variação do torque em um intervalo de tempo e maior a magnitude do *stick-slip*. Já CHEN et al., 2021 ressaltam em seu estudo que, quando pressões maiores são aplicadas, os números de eventos se tornam menores. Dessa forma, observa-se na Figura 7-b a amplitude das oscilações do fenômeno de *stick-slip* se tornam maiores e mais evidentes à medida que a pressão aumenta, explicando o alto valor do *slip power*.

A Figura 8 mostra o comportamento, tanto do atrito estático como do atrito dinâmico, para as duas formulações em função do ciclo do ensaio (Fig.8-a) e em função da pressão de contato (Fig. 8-b). Também foi analisada a diferença entre o atrito estático e dinâmico na condição de aumento de pressão de contato (Fig. 8-c). Os valores de atrito são resultado da média aritmética das três repetições de cada formulação.

Figura 8– Atrito estático e dinâmico médio para NAT e CER: a) Atrito estático e dinâmico médio por ciclo para NAT e CER, b) Atrito estático e dinâmico médio por pressão de contato para NAT e CER c) Diferença entre atrito estático e dinâmico médio por pressão de contato para NAT e CER





É possível observar que o atrito dinâmico apresenta valores menores que o atrito estático, conforme o esperado, ao observar tanto a Fig.8-a como a Fig.8-b. Já na Fig.8-c, em geral, a formulação NAT sempre apresentou uma maior diferença entre os atritos do que a CER, logo, possuindo mais tendência ao *stick-slip*. A partir da Fig.8-a, nota-se que os valores do atrito se estabilizaram na formulação NAT a partir do décimo ciclo, enquanto a CER teve seu comportamento inconstante ao longo do experimento. Já na Figura 8-b, conforme há o aumento da pressão de contato, observa-se novamente que o atrito é menor, resultado aderente aos estudos de DESPLANQUES et al., 2007, discutido na seção 2.4. Este comportamento ocorre de forma similar para as duas formulações.

Pode ser inferido a partir dos resultados, em síntese na Tabela 4 abaixo, que as três formulações tiveram distintos comportamentos durante o procedimento experimental. A amostra comercial, como esperado para os padrões do setor automobilístico, não apresentou *stick-slip*, tendo deslizamento durante todo o ensaio. Por outro lado, as amostras com fibra natural apresentaram o maior número de eventos de *stick-slip* quando comparadas com as amostras com fibra cerâmica. Pode-se também verificar a diferença entre o *slip power* nos experimentos, onde a formulação CER teve uma redução de 28% de *slip power* em relação à NAT. Finalmente, observa-se que os valores dos atritos tiveram resultados semelhantes na Fig. 8, mas a formulação CER teve uma variação entre o atrito estático e dinâmico levemente menor que a CER.

Tabela 4 – Síntese dos resultados do ensaio experimental

Amostra	# de Eventos de <i>stick-slip</i>	<i>Slip power</i>	Atrito estático	Atrito dinâmico	Delta de atrito
COM	-	-	-	-	-
CER	12,6±3,8	0,5±0,17 Nm/s	0,42±0,02	0,40±0,02	0,02±0,02
NAT	55,5±5,7	0,8±0,11 Nm/s	0,41±0,03	0,38±0,03	0,03±0,02

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo comparar o efeito do *stick-slip*, principal fenômeno causador de um ruído de baixa frequência sonora em sistemas de freio, conhecido com *creep groan*, em formulações com fibra natural e cerâmica. A partir dos resultados do ensaio experimental em um tribômetro pôde-se concluir que:

- Em média, a formulação com fibra cerâmica apresentou menor número de eventos de *stick-slip* e *slip power* do que a formulação com fibra natural.
- Em relação ao atrito, as formulações NAT e CER apresentaram resultados similares, contudo, a formulação com fibra cerâmica teve um resultado levemente mais positivo dado a menor diferença entre atrito estático e dinâmico.
- A amostra comercial não apresentou *stick-slip*.

A fibra natural de Grewia Optiva como na presente formulação não se apresentou como um possível substituto da fibra cerâmica para materiais de fricção com relação ao fenômeno de *stick-slip*. A partir do resultado obtido, observou-se que ela obteve um coeficiente de atrito semelhante a CER, mas com maior presença de eventos *stick-slip* e magnitude de *slip power*. Em trabalhos futuros é de interesse a experimentação da fibra GO em outras formulações mais complexas (semelhantes a COM) para se chegar em resultados mais favoráveis sem *stick-slip*. Além disso, pode-se testar o comportamento da formulação NAT frente a condições reais de frenagem (diferentes valores de temperatura, força e velocidade), para ter uma caracterização tribológica completa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadijokani, F.; Shojaei, A.; Arjmand, M.; Alaei, Y.; Yan, N. Effect Of Short Carbon Fiber On Thermal, Mechanical And Tribological Behavior Of Phenolic-Based Brake Friction Materials. **Composites Part B: Engineering**, V. 168, P. 98–105, 1 Jul. 2019.
- Ali, S.; Kumar, N.; Grewal, J. S. G.; Thakur, V.; Chau, K. W.; Kumar, M. Coconut Waste Fiber Used As Brake Pad Reinforcement Polymer Composite And Compared To Standard Kevlar-Based Brake Pads To Produce An Asbestos Free Brake Friction Material. **Polymer Composites**, V. 43, N. 3, P. 1518–1525, 5 Mar. 2022.
- Bajpai, P. K.; Singh, I.; Madaan, J. Tribological Behavior Of Natural Fiber Reinforced Pla Composites. **Wear**, V. 297, N. 1–2, P. 829–840, 15 Jan. 2013.
- Bhushan, B. Friction. *Em: Tribology And Mechanics Of Magnetic Storage Devices*. New York, Ny: Springer New York, 1996. P. 231–365.
- Birch, T. W. **Automotive Braking Systems**. Usa: Delmar Publishers., 1999.
- Bowden, F. P.; Leben, L. The Nature Of Sliding And The Analysis Of Friction. **Proceedings Of The Royal Society Of London. Series A. Mathematical And Physical Sciences**, V. 169, N. 938, P. 371–391, 7 Feb. 1939. Disponível Em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1939.0004>>.
- Chen, R.; Zhang, W.; Sun, W.; Song, Q.; Ye, J.; Liu, X.; Liu, K. Investigation On The Multiscale Stick-Slip Phenomenon Of Cotton Fabric. **Materials Today Communications**, V. 28, 1 Set. 2021.
- Desplanques, Y.; Roussette, O.; Degallaix, G.; Copin, R.; Berthier, Y. Analysis Of Tribological Behaviour Of Pad-Disc Contact In Railway Braking. **Wear**, V. 262, N. 5–6, P. 582–591, Feb. 2007.
- Fuadi, Z.; Adachi, K.; Ikeda, H.; Naito, H.; Kato, K. Experimental Model For Creep Groan Analysis. **Lubrication Science**, V. 21, N. 1, P. 27–40, Jan. 2009.
- Gao, C.; Kuhlmann-Wilsdorf, D.; Make1, D. D. **Fundamentals Of Stick-Slipwear**. [S.L: S.N.].
- Gehlen, G. **Estudo Experimental Do Potencial De Utilização De Casca De Arroz Em Materiais De Fricção De Freios**. [S.L: S.N.].
- Ghazaly, N. M.; Ahmed, I.; Rashad El-Sharkawy, M.; El-Sharkawy, M. A Review Of Automotive Brake Squeal Mechanisms. **Journal Of Mechanical Design And Vibration**, V. 1, N. 1, P. 5–9, 2014. Disponível Em: <<http://pubs.sciepub.com/jmdv/1/1/2>>.
- Hiller, M. B. **Correlation Between Parameters Of The Tribosystem And Automotive Disc Brake Squeal**. [S.L: S.N.].
- Jang, H.; Lee, J. S.; Fash, J. W. **Compositional Effects Of The Brake Friction Material On Creep Groan Phenomenawear**. [S.L: S.N.].
- Kumar, N.; Singh, T.; Grewal, J. S.; Patnaik, A.; Fekete, G. A Novel Hybrid Ahp-Saw Approach For Optimal Selection Of Natural Fiber Reinforced Non-Asbestos Organic Brake Friction Composites. **Materials Research Express**, V. 6, N. 6, P. 065701, 13 Mar. 2019.
- Kumar, V. V.; Kumaran, S. S. **Friction Material Composite: Types Of Brake Friction Material Formulations And Effects Of Various Ingredients On Brake Performance-A Review materials Research Express Institute Of Physics Publishing**, 31 Maio 2019.
- Lee, P. W.; Filip, P. Friction And Wear Of Cu-Free And Sb-Free Environmental Friendly Automotive Brake Materials. **Wear**, V. 302, N. 1–2, P. 1404–1413, Abr. 2013.
- Li, T. T.; Wang, K.; Sueyoshi, T.; Wang, D. D. **Esg: Research Progress And Future Prospects sustainability (Switzerland)**Mdpi, 1 Nov. 2021.
- Liu, W.; Pfeifer, J. Reducing High Frequency Disc Brake Squeal By Pad Shape Optimization. Em: 2000, [...]. 2000.

- Ma, Y.; Shen, S.; Tong, J.; Ye, W.; Yang, Y.; Zhou, J. Effects Of Bamboo Fibers On Friction Performance Of Friction Materials. **Journal Of Thermoplastic Composite Materials**, V. 26, N. 6, P. 845–859, 31 Jul. 2013.
- Neis, P. D. **Projeto E Construção De Um Tribômetro Para Estudos Relacionados A Materiais De Fricção Veiculares**. [S.L: S.N.].
- Neis, P. D. **Projeto E Construção De Um Tribômetro Com Controle Independente Da Temperatura Do Disco**. [S.L: S.N.]. Disponível Em: <Http://Hdl.Handle.Net/10183/75736>. Acesso Em: 8 Ago. 2022.
- Neis, P. D.; Ferreira, N. F.; Matoso, L. T.; Masotti, D.; Poletto, J. C. Definition Of A Suitable Parameter For Characterizing Creep-Groan Propensity In Brake Pads. Em: 2015, [...]. 2015. P. 10945–66.
- Neis, P. D.; Ferreira, N. F.; Poletto, J. C.; Matoso, L. T.; Masotti, D. Quantification Of Brake Creep Groan In Vehicle Tests And Its Relation With Stick-Slip Obtained In Laboratory Tests. **Journal Of Sound And Vibration**, V. 369, P. 63–76, 12 Maio 2016.
- Ostermeyer, G. P. On The Dynamics Of The Friction Coefficient. **Wear**, V. 254, N. 9, P. 852–858, 2003.
- Owen, C. **Automotive Brake Systems, Classroom Manual**. Today's Technician. Delmar Cengage Learning, 2010.
- Poletto, J.C.; Neis, P. D. ; Ferreira, N. F. . Latrib Pro-Ae. 2015. Patente: Programa De Computador. Número Do Registro: Br512017001211-3, Data De Registro: 01/02/2015, Título: "Latrib Pro-Ae" , **Instituição De Registro: Inpi - Instituto Nacional Da Propriedade Industrial**
- Rana, A. K.; Potluri, P.; Thakur, V. K. **Cellulosic Grewia Optiva Fibres: Towards Chemistry, Surface Engineering And Sustainable Materials Journal Of Environmental Chemical Engineering** Elsevier Ltd, 1 Out. 2021.
- Rashid, A. **Overview Of Disc Brakes And Related Phenomena - A Review International Journal Of Vehicle Noise And Vibration** Inderscience Publishers, 1 Nov. 2014.
- Reynolds, O. An Experimental Investigation Of The Circumstances Which Determine Whether The Motion Of Water Shall Be Direct Or Sinuous, And Of The Law Of Resistance In Parallel Channels. **Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London**, V. 174, P. 935–982, 1883. Disponível Em: <Http://Www.Jstor.Org/Stable/109431>.
- Singh, T.; Kumar, N.; Ashok Raj, J.; Grewal, J. S.; Patnaik, A.; Fekete, G. Natural Fiber Reinforced Non-Asbestos Brake Friction Composites: Influence Of Ramie Fiber On Physico-Mechanical And Tribological Properties. **Materials Research Express**, V. 6, N. 11, 27 Set. 2019.
- Singha, A. S.; Thakur, V. K. **Grewia Optiva Fiber Reinforced Novel, Low Cost Polymer Composites**. [S.L: S.N.]. Disponível Em: <Http://Www.E>.
- Solomon, D.; Berhan, M. N. **Characterization Of Friction Material Formulations For Brake Pads**. [S.L.] Newswood Limited, 2007. 33 P.
- Taj, S.; Ali Munawar, M.; Ullah Khan, S. **Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites**. **Proc. Pakistan Acad. Sci.** [S.L: S.N.].
- Yueping, W.; Ge, W.; Haitao, C.; Genlin, T.; Zheng, L.; Feng, X. Q.; Xiangqi, Z.; Xiaojun, H.; Xushan, G. Structures Of Bamboo Fiber For Textiles. **Textile Research Journal**, V. 80, N. 4, P. 334–343, 2010.
- Yun, R.; Filip, P.; Lu, Y. Performance And Evaluation Of Eco-Friendly Brake Friction Materials. **Tribology International**, V. 43, N. 11, P. 2010–2019, Nov. 2010.
- Zeng, M.; Wei, C.; Xiong, X. M.; Yu, C. B. Frictional Brake Material Reinforced With Sisal Fiber And Glass Fiber Hybrid. **Advanced Materials Research**, V. 150–151, P. 284–287, Out. 2010.